第37卷 第6期
2020年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 37 No. 6
Nov. 2020

半干旱区箭舌豌豆播期对间作马铃薯生物量和水分利用效率的影响

张绪成[1,2]， 于显枫[1,2]， 马一凡[1,2]， 侯慧芝[1,2]， 王红丽[1,2]， 方彦杰[1,2]

（1. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所，甘肃 兰州 730070；
2. 甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室，甘肃 兰州 730070）

摘 要：协调马铃薯与绿肥作物对水分的利用，是协同实现二者间作提高半干旱区马铃薯产量和提升耕地质量的关键。于2017—2018年在西北黄土高原半干旱区布置定位试验，间作箭舌豌豆设计6月10日（PS1）、6月26日（PS2）和7月10日（PS3）3个播期，以马铃薯单作（P）为对照，测定土壤水分、生物量、马铃薯叶片叶绿素相对含量（Soil and Plant Analyzer Development，SPAD）、冠层温度和产量等指标。结果表明，与P相比，平水年（2017年）PS1降低了马铃薯花期120~160 cm土层和块茎膨大期20~40 cm土层的土壤贮水量，PS2和PS3则增加了块茎膨大期140~200 cm、收获期0～80 cm土层的土壤贮水量；间作提高了丰水年（2018年）土壤贮水量。平水年PS1花前耗水量最高，较PS3提高了15.7%；丰水年PS3最高，较PS1增加了17.9%，但均和P、PS2无显著差异；P的花后耗水量在平水年分别较PS1、PS2和PS3增加了70.9%、48.6%和32.0%；PS3的花后耗水量在丰水年分别较P、PS1和PS2增加了24.3%、23.1%和38.1%，均达到显著差异。PS2和PS3的地上生物量较P在2017和2018年分别增加了1.1%~12.4%和11.0%~13.2%，且PS3在平水年显著提高了水分利用效率（Water Use Efficiency, WUE）。平水年P和PS3的产量无显著差异，但显著高于PS1和PS2；丰水年P、PS2和PS3的产量无显著差异，但显著高于PS1。因此，半干旱区马铃薯间作的箭舌豌豆适宜播期在6月下旬到7月上中旬，在不降低马铃薯块茎产量的基础上增加地上部生物量，并显著提高平水年马铃薯的WUE。

关键词：半干旱区；播种时期；间作；阶段耗水；生物量；产量；水分利用效率

作物间作能增加农田生态系统的生物多样性，可以有效地降低病虫害发生的频度和强度[1]，主要是间作能够有效降低根际土壤真菌的数量[1-3]，改善土壤的生物环境，使病害发生发展的几率和程度显著低于单作地块[4-5]。我们的研究也证明，马铃薯和扁豆间作能够降低高温时段的土层温度，并促进马铃薯在开花后的耗水量，在保持土壤水分年际持续的基础上提高马铃薯产量[6]。因此，在半干旱区全膜覆盖条件下，马铃薯间作低耗水豆科作物是可行的，能够有效降低马铃薯连作造成的减产和耕地质量下降[7]。绿肥作物兼具用地养地功能，间作后翻压还田，能够有效改善土壤化学和生物性状，增加土地的可持续生产能力[8-12]，通过马铃薯与绿肥作物的间作并还田，将有可能在实现马铃薯持续高产的情况下提升耕地质量。

在西北半干旱区马铃薯的生产实践中，存在马铃薯生长早期的季节性干旱胁迫和后期雨季的高湿胁迫[13-14]。季节性干旱、尤其是夏末秋初干旱是限制半干旱区全膜马铃薯产量持续提高的关键因素之一[11-13]。在地膜覆盖垄作条件下，自然降水被充分聚集入渗[13]，克服季节性干旱的主要途径包括增强作物对水肥的吸收能力和土壤的水肥供应能力[11-12]。优化耕作方法一方面能够疏松土壤，促进水分入渗和活化土壤养分，另外可促进作物根系发育和吸收水分能力，能够显著增强作物抵御干旱胁迫的能力[15-17]。立式深旋耕作技术是借鉴粉垄耕作的技术原理[18-19]，并结合西北黄土高原旱作区立地条件和作物生产特性发展而来的耕作技术，能够显

收稿日期：2020-06-05； **修订日期：**2020-07-16
基金项目：国家重点研发计划（2018YFD020080105）；国家自然科学基金（31960398，31560355）共同资助
作者简介：张绪成（1973-），男，博士，研究员，研究方向为旱地农业及农业生态. E-mail: gazhangxuch@163.com

著改善土壤的水分特性,提高土壤供水能力,缓解季节性干旱对作物生长的胁迫[11-12]。马铃薯生长后期处于块茎形成和膨大的7—9月份,这一阶段较高的土壤水分对块茎发育有不利影响[20],适当降低此期土壤水分有助于提高块茎产量;另外,这一时期土壤水分含量过高会导致病害发生发展[21-22],使马铃薯产量和品质下降;再次,长期连作导致马铃薯病虫害大面积发生,对马铃薯生产能力可持续提高造成明显的不利影响[23]。因此,在立式深旋耕作条件下,寻求适宜的间作方法以协同马铃薯和绿肥作物对水分的利用,提高季节性干旱时段的土壤供水能力,并降低雨季病虫害发生发展,是实现半干旱区马铃薯持续增产的关键科学和技术问题。基于以上目的,于2017—2018年布设定位试验,研究在立式深旋耕作条件下,绿肥不同播期对马铃薯耗水及产量的影响,以寻求适宜的马铃薯和绿肥间作模式。

1　材料与方法

1.1　试验地点

试验于2017—2018年在甘肃省定西市安定区执行,该区地处西北黄土高原丘陵沟壑区(35°35′N,104°36′E),海拔1970 m,多年平均气温6.2 ℃,年均辐射总量达到5898 M J· m^{-2},≥10 ℃的平均有效积温为2075.1 ℃,无霜期天数为140 d,为典型的中温带半干旱气候。试验区是典型西北黄土高原旱作雨养农业区,作物一年一熟,马铃薯为主要栽培作物之一。年均降水量为415 mm,其中68%集中在6—9月。该区土壤为黄绵土,0~30 cm土层平均土壤容重为1.25 g·cm^{-3},平均田间持水量和凋萎系数分别为21.2%、7.2%,土壤有机质、全N、全P、全K、NH_4^+-N、NO_3-N、速效P和速效K含量分别为12.0 g·kg^{-1}、1.2 g·kg^{-1}、0.3 g·kg^{-1}、17.3 g·7kg^{-1}、4.8 mg·kg^{-1}、0.8 mg·kg^{-1}、8.7 mg·kg^{-1}和121.5 mg·kg^{-1},土壤偏碱性,pH值为8.4。

1.2　试验设计

马铃薯采用全膜覆盖垄上微沟种植,种植带宽为100 cm,其中垄宽60 cm,沟宽40 cm(图1)。在垄上开小沟,小沟内的地膜上每隔50 cm打孔促使降水入渗。试验采用随机区组设计,4个处理包括马铃薯单作,马铃薯和箭舌豌豆间作Ⅰ(箭舌豌豆6月10日播种,PS1)、马铃薯和箭舌豌豆间作Ⅱ(箭舌豌豆6月26日播种,PS2)、马铃薯和箭舌豌豆间作Ⅲ(箭舌豌豆7月10日播种,PS3)。试验小区面积5.2 m×10 m=52 m^2,每处理3次重复。马铃薯种植在垄上微沟的垄顶,播种深度8~10 cm。供试品种为'陇薯10号',播种密度57000株·hm^{-2},行距50 cm,株距35 cm。箭舌豌豆穴播在沟内,每沟种植两行。有机肥施用量为15000 kg·hm^{-2},在小区内均匀撒施;化肥纯N、P_2O_5和K_2O施用量分别为73.5、135和30 kg·hm^{-2},化肥花期追肥,基:追=6:4,基肥在耕作前均匀撒施于垄底,追肥在花期用穴播器施于垄上两株马铃薯之间。2017年马铃薯于4月21日播种,10月8日收获;2018年于4月23日播种,10月10日收获。试验各处理在全生育期不灌溉,除拔草和花期追肥外不进行其他管理。

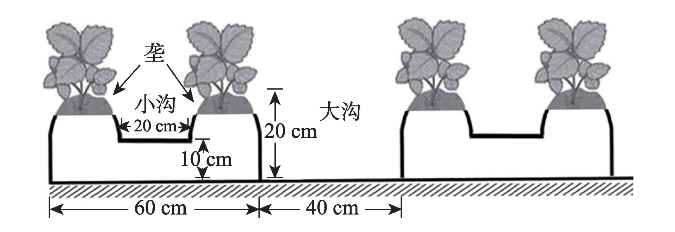


图1　马铃薯全膜覆盖垄上微沟种植技术示意图

Fig. 1　Schematic diagram of potato micro-furrows on ridges and planting with plastic mulching

1.3　试验区降水量和平均气温

根据甘肃省农业科学院定西试验站气象资料统计,试验区2017年为平水年,全年降水量为418.3 mm,马铃薯生育期降水量为326.1 mm;2018年为丰水年,全年降水量为533.3 mm,马铃薯生育期降水量为441.1 mm。2017年在马铃薯盛花期发生持续干旱,季节分配不均;2018年花前降水达到263.7 mm。2017年日均温度为7.2 ℃,2018年为6.9 ℃(图2)。降水和气温年际差异对马铃薯的生长造成一定影响,导致年际间产量不一致。

1.4　测定指标与方法

1.4.1　土壤水分　采用土钻烘干法,测定马铃薯播种、现蕾、盛花、块茎膨大和收获期的土壤含水量。每小区在垄上马铃薯株间选择一个取样点,测定深度为0~200 cm,测定步长为20 cm。根据测定的土壤含水量,参考王红丽等[13]的公式计算土壤贮水量(SWS):

$$SWS=WS\times\gamma\times d/100$$

式中:WS为土壤质量含水量(g·kg^{-1});γ为土壤容重(g·cm^{-3});d为土壤深度(cm)。

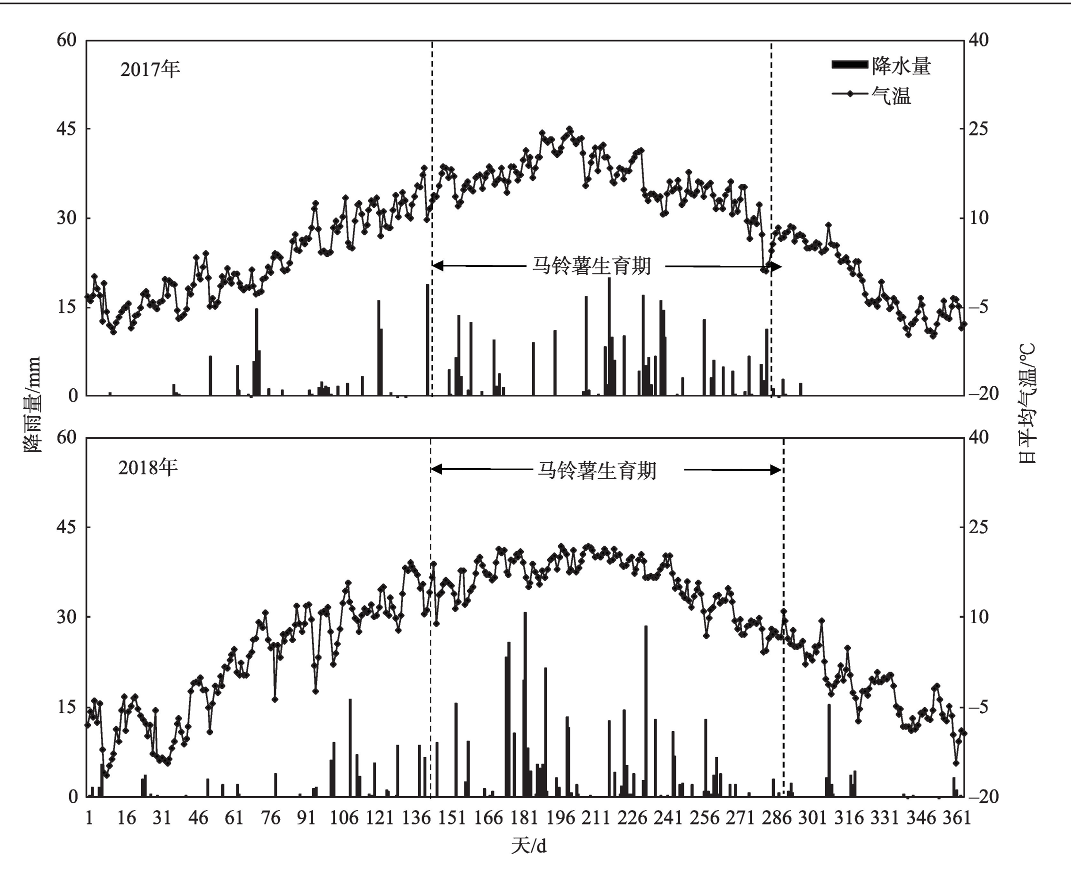


图2 2017—2018年试验区降水(*P*)和平均气温(*T*)变化

Fig. 2 Changes of precipitation (*P*) and average air temperature (*T*) in experimental area from 2017 to 2018

1.4.2 阶段耗水量(ET_i):

$$ET_i=SWS_i-SWS_{i+1}+P$$

式中:SWS_i为某个生育时期初始时的土壤贮水量(mm);SWS_{i+1}为该生育时期结束时的土壤贮水量(mm);P为生育期降水量(mm)。

1.4.3 SPAD和冠层温度 马铃薯现蕾期、盛花期和块茎膨大期,用SPAD-502 PLUS(日本,柯尼卡美能达)在晴天上午10:00,选择马铃薯倒二枝完全展开的顶叶测定叶片SPAD值,每个叶片避开叶脉自上而下测定3次,每小区选择10个叶片,取平均值为该小区叶片SPAD值;用CID-100测定冠层温度,每小区测定5个位置,计算平均值为该小区冠层温度值。

1.4.4 生物量和产量 分别在马铃薯现蕾期、盛花期、块茎膨大期和收获期,马铃薯在每小区选择有代表性的3株,箭舌豌豆每小区选取1沟(每沟面积为0.4 m×10 m=4 m²),用风干—烘干相结合的方法,测定马铃薯和箭舌豌豆地上生物量。马铃薯成熟期收获后每小区按实际块茎鲜质量计算产量。

1.4.5 水分利用效率(WUE)

$$WUE=Y_d/ET$$

$$ET=SWS_{BF}-SWS_{HA}+P$$

式中:Y_d为产量(kg·hm^{-2});SWS_{BF}为播前土壤贮水量(mm);SWS_{HA}为收后土壤贮水量(mm);P为马铃薯全生育期降水量(mm)[5]。

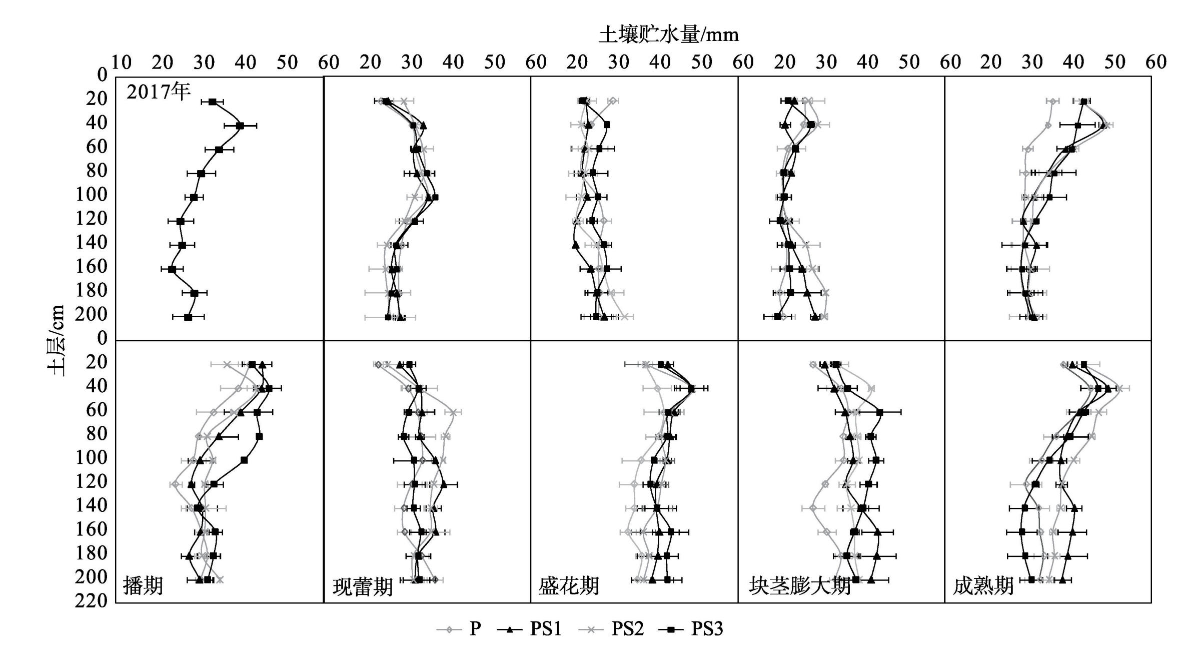
1.5 数据处理

文中数据采用DPS数据处理软件通过ANOVA方法进行方差分析,并用LSD法进行多重比较(α=0.05)。

2 结果与分析

2.1 箭舌豌豆播期对马铃薯不同生育期土壤剖面贮水量的影响

箭舌豌豆的播种时期分别在6月10日,6月26日和7月10日,对应的马铃薯生育期分别为现蕾前30 d、15 d和现蕾期。2017年(平水年)4个处理0~200 cm土层土壤贮水量在现蕾期无明显差异(图3),盛花期PS1在各土层的土壤贮水量低于P,且在120~160 cm土层达到显著差异;PS3在30~40 cm土层土壤贮水量显著高于P,PS2在80~120 cm显著低于P。块茎膨大期,PS1在20~40 cm土层的土壤贮



注:P为马铃薯单作,PS1、PS2和PS3为6月10日、6月26日、7月10日播种箭舌豌豆。下同。

图3 箭舌豌豆播期对土壤剖面贮水量的影响

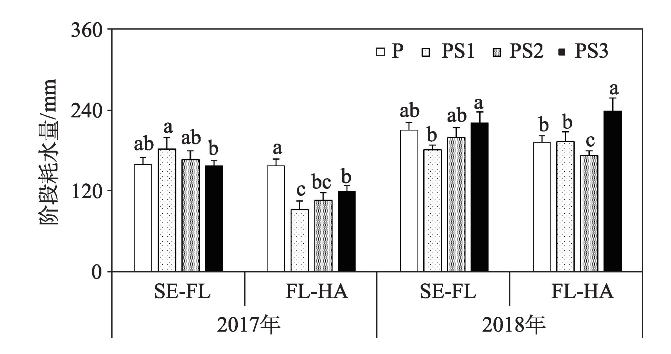
Fig. 3 Effects of different sowing stages of spring vetch on soil water storage at different growth stage of potato

水量显著低于P,PS2和PS3则较P分别下降了37.1%和29.5%,达到显著差异。收获期,P在0~80 cm土层的土壤贮水量较PS1、PS2、PS3分别下降35.0 mm、37.8 mm和32.1 mm,差异显著。

2018年(丰水年),播期PS3在30~120 cm土层土壤贮水量较P、PS1和PS2分别增加了54.4 mm、29.1 mm和36.8 mm。现蕾期PS2在40~80 cm土层的贮水量分别较P、PS1和PS3增加14.4 mm、13.8 mm和21.0 mm。盛花期P较3个绿肥间作处理的土壤贮水量分别在20~40 cm、100~160 cm显著下降,三个间作处理之间差异不明显。块茎膨大期P在100~160 cm土层较PS1、PS2和PS3下降了28.8 mm、21.2 mm和29.2 mm,达到显著差异;而PS3在40~120 cm土层较P、PS1和PS2显著增加了32.3 mm、24.2 mm和18.1 mm。

2.2 箭舌豌豆播期对马铃薯/箭舌豌豆间作体系阶段耗水量的影响

2017年,PS1的花前耗水量最高,且与PS3达到显著差异,提高了15.7%(图4);2018年PS3的马铃薯花前耗水量最高,较PS1显著增加了17.9%。2017年花后耗水量以P最高,且与PS1、PS2和PS3均达到显著差异,分别增加了70.9%、48.6%和32.0%,且PS3显著高于PS1,增加了29.4%;2018年PS3的花后耗水量较P、PS1和PS2增加了24.3%、



注:SE、FL和HA分别为苗期、盛花期和收获期,同一年份相同阶段的图柱标注不同字母表示在0.05水平上存在显著差异。下同。

图4 箭舌豌豆播期对阶段耗水量的影响

Fig. 4 Effects of different sowing stages of spring vetch on periodic evapotranspiration (ET) of intercropping system

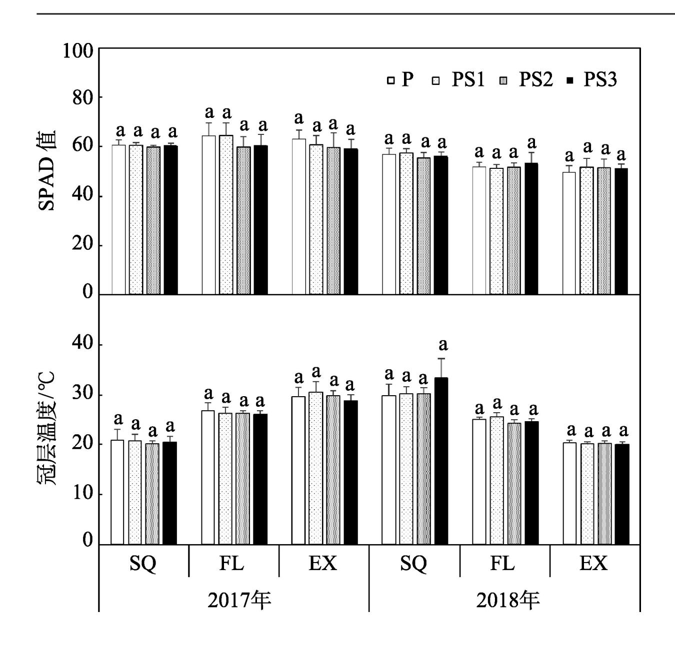
23.1%和38.1%,而且P和PS1显著高于PS2。

2.3 箭舌豌豆播期对马铃薯叶片SPAD和间作体系冠层温度的影响

各处理的SPAD值在不同生育期均无显著差异,冠层温度呈相似的结果(图5)。这表明绿肥间作对单株马铃薯养分吸收可能无明显影响,而且处理间土壤水分的变化未能导致间作体系干旱胁迫程度的差异。

2.4 箭舌豌豆播期对地上生物量的影响

4个处理的马铃薯地上生物量在现蕾期无显著差异(表1)。2017年盛花期,P和PS3较PS1增加了



注：SQ、FL和EX分别为现蕾期、盛花期和块茎膨大期，同一年份相同阶段的图柱标注不同字母表示在0.05水平上存在显著差异。

图5 箭舌豌豆播期对马铃薯叶片SPAD和间作体系冠层温度的影响

Fig. 5 Effects of different sowing stages of spring vetch on foliar SPAD value of potato and canopy temperature of intercropping system

22.6%和36.5%，块茎膨大期较PS1增加了16.8%和19.6%，收获期P和PS3较PS1分别增加了20.6%和18.7%，较PS2增加了15.0%和13.2%，均达到显著差异。2018年的现蕾期，P和PS3较PS1分别增加34.3%和25.6%；花期P较PS1和PS2提高了34.3%和21.6%；块茎膨大期P、PS2和PS3较PS1增加了40.4%、36.3%和38.8%，以上均达到显著差异。

箭舌豌豆的地上生物量在2017年和2018年均以PS1最高，与PS2和PS3达显著差异。间作体系地上生物量在2017年现蕾期以PS1最高，分别较P、PS2和PS3增加了13.2%、14.2%和12.0%；盛花期以PS3最高，较PS1和PS2显著提高了28.3%和19.2%；块茎膨大期间作处理间无显著差异，但较P显著增加了17.1%、10.9%和17.8%；收获期PS3最高，与P和PS2达到显著差异。2018年现蕾期PS1最高，较PS2显著提高12.2%；盛花期P最高，较PS1和PS2增加24.8%和17.9%；块茎膨大期PS2和PS3较P增加14.3%和14.6%；收获期，P较PS1、PS2和PS3分别下降16.9%、12.4%和13.2%，且3个间作处理间无显著差异。

2.5 箭舌豌豆播期对马铃薯产量和水分利用的影响

2017年，P和PS3的马铃薯块茎产量无显著差异（表2），但P较PS1和PS2分别增加11.0%和12.6%，PS3较PS1和PS2分别增加12.4%和14.1%；2018年P、PS2和PS3之间无显著差异，但较PS1分别增加28.2%、19.1%和20.2%。2017年P的耗水量最高，且与3个间作处理达到显著差异；2018年PS3的耗水量最高，较P、PS1和PS2分别增加14.2%、22.5%和23.4%。2017年PS3的水分利用效率（WUE）较P、PS1和PS2分别增加16.0%、11.4%和12.4%，均达到显著差异；2018年P和PS2之间无显著差异，但显著高于PS1和PS3。

表1 箭舌豌豆播期对地上生物量的影响

Tab. 1 Effects of different sowing stages of spring vetch on aboveground biomass

	处理	2017年 现蕾期（SQ）	2017年 盛花期（FL）	2017年 块茎膨大期（EX）	2017年 收获期（HA）	2018年 现蕾期（SQ）	2018年 盛花期（FL）	2018年 块茎膨大期（EX）	2018年 收获期（HA）
马铃薯地上生物量/(t·hm^{-2})	P	3.8a	21.4a	25.0a	44.5a	7.0a	23.1a	33.7a	51.2a
	PS1	3.9a	17.5b	21.4b	36.9b	7.1a	17.2c	24.0b	47.8a
	PS2	3.7a	19.5ab	23.6ab	38.7b	6.7a	19.0b	32.7a	49.2a
	PS3	3.8a	23.8a	25.6a	43.8a	6.9a	21.6ab	33.3a	48.5a
箭舌豌豆地上生物量/(t·hm^{-2})	P	–	–	–	–	–	–	–	–
	PS1	0.3	1.1a	7.9a	9.6a	0.4	1.3a	10.3a	12.1a
	PS2	–	0.5b	4.1b	6.3b	–	0.6b	5.8b	8.3b
	PS3	–	–	3.8b	5.6c	–	–	5.3b	9.4b
间作体系地上生物量/(t·hm^{-2})	P	3.8b	21.4ab	25.0c	44.5b	7.0ab	23.1a	33.7b	51.2b
	PS1	4.2a	18.5b	29.3a	46.5ab	7.5a	18.5c	34.3b	59.8a
	PS2	3.7b	20.0b	27.7a	45.0b	6.7b	19.6bc	38.5a	57.5a
	PS3	3.8b	23.8a	29.4a	49.4a	6.9ab	21.6ab	38.6a	57.9a

表2 箭舌豌豆播期对马铃薯块茎产量的影响

Tab. 2 Effects of different sowing stages of spring vetch on potato tuber yield

处理	2017年			2018年		
	产量/(kg·hm^{-2})	耗水量ET/mm	水分利用效率WUE/(kg·hm^{-2}·m^{-1})	产量/(kg·hm^{-2})	耗水量ET/mm	水分利用效率WUE/(kg·hm^{-2}·m^{-1})
P	35 383.8a	316.9a	111.6b	36672.2a	401.7b	91.3a
PS1	31 883.0b	274.3b	116.2b	28610.5b	374.7b	76.3b
PS2	31 425.9b	272.8b	115.2b	34065.1a	371.8b	91.6a
PS3	35 842.5a	276.7b	129.5a	34382.6a	458.9a	74.9b

3 讨论

作物间套作能够优化土壤养分和生物环境,提高可持续生产能力[24-25],通过绿肥作物间作并还田是提高耕地质量的有效措施,并在灌区实现作物增产[26-27]。在半干旱旱作区,水分不足是制约作物增产的关键因素,因此,在该区域发展间套作必须首先解决间作体系的水分合理利用问题[28]。在马铃薯与蚕豆、豌豆和扁豆间作的研究证明,全膜垄沟种植马铃薯与蚕豆间作,加重了干旱胁迫对马铃薯生产的不利影响;但与扁豆间作后对土壤水分无明显不利影响,并能提高马铃薯产量[6]。本试验研究了间作箭舌豌豆的不同播期对马铃薯水分利用和产量的影响,结果表明,箭舌豌豆的播种时期对间作体系的土壤贮水量有明显影响,与马铃薯单作相比,2017年PS1使马铃薯花期120~160 cm土层的贮水量明显下降,PS2和PS3则使块茎膨大期140~200 cm、收获期0~80 cm土层土壤贮水量显著增加;在降水丰沛的2018年,间作总体上提高了土壤贮水量。这一结果意味着马铃薯和箭舌豌豆间作,可能会抑制马铃薯耗水,导致间作体系耗水下降,虽然这对优化土壤水分环境有利,但不能有效促进对水分的有效利用以提高生产力。另外,间作体系的耗水量因间作时间和降水年型的不同而异,这表明可通过调节间作时间来降低对马铃薯水分利用的影响。本研究还发现,PS1降低了块茎膨大期20 ~ 40 cm土层土壤贮水量,这对促进块茎发育有一定的促进作用。

向日葵与马铃薯间作的耗水量明显高于马铃薯单作[26],但与扁豆间作的耗水量与马铃薯单作无显著差异[6],因此,间作对耗水量的影响因间作作物而异,且其对花前花后耗水的影响不同。本试验中,间作在2017年和2018年对花前耗水量无显著影响,但显著降低了2017年的花后耗水量,这不利于块茎发育和产量提高[28]。就总耗水量而言,马铃薯和箭舌豌豆间作的耗水量在2017年较P降低40.3~44.2 mm,2018年PS1和PS2的耗水量下降了27.0 mm、29.9 mm,这是由于箭舌豌豆耗水量低于马铃薯,且抑制了马铃薯耗水,所以导致间作体系耗水量较马铃薯单作下降。相对于耗水量,2017年PS1和PS2的马铃薯地上生物量低于单作处理,2018年单作马铃薯的生物量高于3个间作处理,反映出间作抑制了马铃薯耗水。但间作提高了体系的地上生物量,并在2018年的块茎膨大期和收获期达到显著差异;另外,间作对叶片SPAD值无明显影响,反映出养分利用未随间作而明显改变;冠层温度的结果也表明,间作没有明显增加水分的胁迫强度。PS3在2017年的块茎产量与P无显著差异,但WUE和地上生物量显著增加;2018年WUE明显下降,但产量无显著差异;PS2的产量和水分利用效率在2018年无显著差异,但地上生物量显著增加;PS1的块茎产量在2017年和2018年均显著低于马铃薯单作。因此,间作体系生物量、马铃薯产量和耗水量受降水年型和间作时间的显著影响,在平水年,适当延后间作时间可在不降低马铃薯产量的前提下获得一定的箭舌豌豆生物量;而丰水年则可适当提前间作时间。虽然本试验没有涉及到干旱年份,但从平水年试验结果看,干旱年份间作箭舌豌豆将会对马铃薯的水分吸收利用形成竞争,造成产量下降。因此,在半干旱旱作区,干旱年份马铃薯间作箭舌豌豆存在一定风险。由于该区域年均降水量为415 mm,而2017年总降水量为418.3 mm,且PS3对马铃薯产量无显著不利影响,推测长期马铃薯箭舌豌豆间作对水分持续性无明显影响。综合耗水量、SPAD值、冠层温度、生物量、产量和WUE结果,认为在平水年或丰水年的6月底到7月上旬间作箭

舌豌豆能在不降低马铃薯块茎产量的基础上获得一定的绿肥生物量,能够实现水分的高效利用,是相对适宜的间作箭舌豌豆播种时期。

4 结 论

与马铃薯单作相比,平水年PS2和PS3显著降低耗水量,提高地上生物量,且PS3显著提高WUE;丰水年PS2的产量和WUE无明显下降,但显著提高地上生物量,PS3则显著提高耗水量和地上生物量。而且箭舌豌豆间作未造成明显的养分和水分胁迫。表明在6月下旬到7月上中旬为间作箭舌豌豆的适宜播期,能够在马铃薯不减产的情况下提高水分利用效率。

参考文献(References)

[1] 杜成章, 陈红, 李艳花, 等. 蚕豆马铃薯间作种植对蚕豆赤斑病的防控效果[J]. 植物保护, 2013, 39(2): 180-183. [Du Chengzhang, Chen Hong, Li Yanhua, et al. Prevention and control effect of intercropping faba bean and potato on faba bean chocolate spot disease[J]. Plant Protection, 2013, 39(2): 180-183.]

[2] 章家恩, 高爱霞, 徐华勤, 等. 玉米/花生间作对土壤微生物和土壤养分状况的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1597-1602. [Zhang Jia'en, Gao Aixia, Xu Huaqin, et al. Effects of maize/peanut intercropping on rhizosphere soil microbes and nutrient contents[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1597-1602.]

[3] 汪春明, 马琨, 代晓华, 等. 间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物区系的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(6): 711-716. [Wang Chunming, Ma Kun, Dai Xiaohua, et al. Effect of intercropping on soil microflora in rhizosphere soil of potato under continuous cropping[J]. Journal of Eecology and Rrural Environment, 2013, 29(6): 711-716.]

[4] 杨进成, 刘坚坚, 安正云, 等. 小麦蚕豆间作控制病虫害与增产效应分析[J]. 云南农业大学学报, 2009, 24(3): 340-348. [Yang Jincheng, Liu Jianjian, An Zhengyun, et al. Analyses on effect of interplanting on diseases and pests control and yield increase of wheat and fababean[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2009, 24(3): 340-348.]

[5] 肖靖秀, 周桂凤, 汤利, 等. 小麦/蚕豆间作条件下小麦的氮、钾营养对小麦白粉病的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 517-522. [Xiao Jingxiu, Zhou Guisu, Tang Li, et al. Effects of nitrogen and potassium nutrition on the occurrence of Blumeria graminis (DC). Speer of wheat in wheat and faba bean intercropping[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(4): 517-522.]

[6] 张绪成, 王红丽, 于显枫, 等. 半干旱区全膜覆盖垄沟间作种植马铃薯和豆科作物的水热及产量效应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 468-481. [Zhang Xucheng, Wang Hongli, Yu Xianfeng, et al. The study on the effect of potato and beans intercropping with whole field plastics mulching and ridge-furrow planting on soil thermal-moisture status and crop yield on semi-arid area [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(3): 468-481.]

[7] 马琨, 杨桂丽, 马玲, 等. 间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 2987-2995. [Ma Kun, Yang Guili, Ma Ling, et al. Effects of intercropping on soil microbial communities after long-term potato monoculture[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): 2987-2995.]

[8] 曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1450-1461. [Cao Weidong, Bao Xingguo, Xu Changxu, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1450-1461.]

[9] 樊志龙, 柴强, 曹卫东, 等. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1389-1402. [Fan Zhilong, Chai Qiang, Cao Weidong, et al. Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1389-1402.]

[10] 张绪成, 马一凡, 于显枫, 等. 西北半干旱区深旋松耕作对马铃薯水分利用和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3293-3301. [Zhang Xucheng, Ma Yifan, Yu Xianfeng, et al. Effects of vertically rotary sub-soiling tillage on water utilization and yield of potato in semiarid area of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3293-3301.]

[11] 张绪成, 马一凡, 于显枫, 等. 立式深旋松耕对西北半干旱区土壤水分性状及马铃薯产量的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(12): 156-165. [Zhang Xucheng, Ma Yifan, Yu Xianfeng, et al. Effects of vertical rotary sub- soiling on soil characteristics and potato yield in a semi-arid area of Northwest China[J]. Acta Prataculture Sinica, 2018, 27(12): 156-165.]

[12] 侯慧芝, 王娟, 张绪成, 等. 半干旱区全膜覆盖垄上微沟种植对土壤水热及马铃薯产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(10): 1582-1590. [Hou Huizhi, Wang Juan, Zhang Xucheng, et al. Effects of mini-ditch planting with plastic mulching in ridges on soil water content, temperature and potato yield in rain-fed semiarid region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(10): 1582-1590.]

[13] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 等. 黑色地膜覆盖的土壤水热效应及其对马铃薯产量的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5215-5226. [Wang Hongli, Zhang Xucheng, Yu Xianfeng, et al. Effect of using black plastic film as mulch on soil temperature and moisture and potato yield[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5215-5226.]

[14] Zhang X C, Ma Y F, Yu X F, et al. Effects of vertical rotary subsoiling with plastic mulching on soil water availability and potato yield on a semiarid Loess plateau, China[J]. Soil & Tillage Re-

search, 2020, 199: 104591.

[15] 李华, 逄焕成, 任天志, 等. 深旋松耕作法对东北棕壤物理性状及春玉米生长的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 647-656. [Li Hua, Pang Huancheng, Ren Tianzhi, et al. Effects of deep rotary- subsoiling tillage method on brown physical properties and maize growth in northeast of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(3): 647-656.]

[16] 李轶冰, 逄焕成, 杨雪, 等. 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(23): 7478-7486. [Li Yibing, Pang Huancheng, Yang Xue, et al. Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-huai-hai Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7478-7486.]

[17] 韦本辉, 甘秀芹, 申章佑, 等. 粉垄栽培甘蔗试验增产效果[J]. 中国农业科学, 2011, 44 (21): 4544 -4550. [Wei Benhui, Gan Xiuqin, Shen Zhangyou, et al. Yield increase of smash-ridging cultivation of sugarcane[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(21): 4544-4550.]

[18] 韦本辉, 甘秀芹, 申章佑, 等. 粉垄栽培木薯增产效果及理论探讨[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 78-81. [Wei Benhui, Gan Xiuqin, Shen Zhangyou, et al. Production increasing and discussion in theory of smash-ridging cultivate cassava[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(21): 78-81.]

[19] 刘霞, 胡先奇, 杨艳丽, 等. 马铃薯粉痂菌诱饵植物筛选及环境对病害发生的影响[J]. 中国马铃薯, 2014, 28(1): 35-42. [Liu Xia, Hu Xianqi, Yang Yanli. Screening for bait-plant of *Spongospora subterranea* and impact of environments on potato powdery scab disease occurrence[J]. Chinese Potato Journal, 2014, 28(1): 35-42.]

[20] HIMS M. The weather relationship of powdery scab disease of potatoes[J]. Annals of Applied Biology, 1976, 84: 274-275.

[21] 杜成章, 陈红, 李艳花, 等. 蚕豆马铃薯间作种植对蚕豆赤斑病的防控效果[J]. 植物保护, 2013, 39(2): 180-183. [Du Chengzhang, Chen Hong, Li Yanhua, et al. Prevention and control effect of intercropping faba bean and potato on faba bean chocolate spot disease[J]. Plant Protection, 2013, 39(2): 180-183.]

[22] 张庆霞, 宋乃平, 王磊, 等. 马铃薯连作栽培的土壤水分效应研究 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1212-1217. [Zhang Qingxia, Song Naiping, Wang Lei, et al. Ecological effects of continuous potato cropping on soil water[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1212-1217.]

[23] 章家恩, 高爱霞, 徐华勤, 等. 玉米/花生间作对土壤微生物和土壤养分状况的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1597-1602. [Zhang Jia'en, Gao Aixia, Xu Huaqin, et al. Effects of maize/peanut intercropping on rhizosphere soil microbes and nutrient contents[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1597-1602.]

[24] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency[J]. Plant and Soil, 2003, 248: 305-312.

[25] 郝娜, 武志海, 张立祯, 等. 向日葵与蚕豆和马铃薯间作对作物产量和水分利用效率的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40 (6): 666-674. [Hao Na, Wu Zhihai, Zhang Lizhen, et al. Effects of sunflower intercropping with faba bean and potato on crop yield and water use efficiency[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2018, 40(6): 666-674.]

[26] 柴强, 杨彩红, 黄高宝. 交替灌溉对西北绿洲区小麦间作玉米水分利用的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(9): 1623-1630. [Chai Qiang, Yang Caihong, Huang Gaobao. Water use characteristics of alternately irrigated wheat/maize intercropping in oasis region of northwestern China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(9): 1623-1630.]

[27] 张绪成, 于显枫, 王红丽, 等. 半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控[J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 852-864. [Zhang Xucheng, Yu Xianfeng, Wang Hongli, et al. Regulations of reduced chemical nitrogen, potassium fertilizer application and organic manure substitution on potato water fertilizer utilization and biomass assimilation under whole field plastics mulching and ridge-furrow planting system on semi-arid area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(5): 852-864.]

[28] 王荣栋, 尹经章. 作物栽培学[M]. 北京: 高等教育出版社. 2015. [Wang Rongdong, Yin Jingzhang. Crop Cultivation Science [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.]

Effects of the sowing date on aboveground biomass and water utilization of potato and spring vetch intercropping systems with vertical rotary sub-soiling tillage on a semi-arid area

ZHANG Xu-cheng[1,2], YU Xian-feng[1,2], MA Yi-fan[1,2], HOU Hui-zhi[1,2], WANG Hong-li[1,2], FANG Yan-jie[1,2]

(1. *Institute of Dryland Farming, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*; 2. *Key Laboratory of High Water Utilization on Dryland of Gansu Province, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*)

Abstract: Intercropping potato and green manure may be a promising way to both increase potato tuber yields and improve soil quality. The key problem to overcome the coordination of water utilization between potato and green manure in rain-fed semi-arid areas. A field experiment was conducted from 2017 to 2018 in a semi-arid area in Northwest Loess Plateau. The three sowing dates of spring vetch includes 10 June (PS1), 26 June (PS2), and 10 July (PS3). These dates were incorporated into the design of the intercropping system; mono-potato (P) was used as the control. The soil water content, aboveground biomass, foliar soil and plant analyzer development (SPAD) value, canopy temperature, and tuber yield were measured. Study results showed that PS1 decreased soil water storage (SWS) in a 120−160 cm profile at flowering stage, and in a 20−40 cm profile at tuber expanding stage. PS2 and PS3 increased SWS in a 140−200 cm profile at tuber expanding stage, and in a 0−80 cm profile at harvesting stage during a normal year (2017). Three intercropping treatments increased SWS in a wetting year (2018), when compared with P. The evapotranspiration (ET) rate during pre-flowering period was highest in PS1 in a normal year, it also increased by 15.7% when compared with PS3. However, it was highest in PS3 in a wetting year, where it increased by 17.9% compared with PS1, and without significant difference compared to P and PS2. ET in post-flowering period was highest with P in a normal year, and significantly increased by 70.9%, 48.6%, and 32.0% respectively, as compared with PS1, PS2, and PS3. ET was highest in PS3 in a wetting year, where it significantly increased by 24.3%, 23.1%, and 38.1% respectively, as compared with P, PS1, and PS2. The aboveground biomass of PS2 and PS3 increased by 1.1%−12.4% in 2017, and 11.0%−13.2% in 2018, and PS3 significantly increased water use efficiency in a normal year, when compared with P. Tuber yield of P and PS3 were not significantly different, but were significantly higher than PS1 and PS2 in a normal year. However, the tuber yield did not significantly differ among P, PS2, and PS3, but was significantly higher than PS1. Consequently, aboveground biomass in spring vetch sown from late June to early July in the intercropping system in a semi-arid area will be increased without a remarkable decrement in tuber yields of potato; even the water use efficiency (WUE) will increase in a normal year.

Key words: semi-arid area; sowing date; intercropping; periodic water consumption; aboveground biomass; tuber yield; water use efficiency